



DOI: 10.12086/oe.2018.180054

基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法

张芳燕¹, 骆挺^{1,2*}, 蒋刚毅¹, 徐海勇^{1,2}, 周武杰³¹ 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;² 宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315212;³ 浙江科技学院信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310023

摘要: 针对立体图像版权保护问题, 提出了一种基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法。由于张量分解能够较好地保存图像的主要能量, 因此, 首先利用彩色视点中 RGB 三通道之间的相关性, 对左右视点分别进行张量分解。每一个视点分解出三个特征图, 其中每个视点的第一个特征图保留了每个视点中较强的三通道关系。其次, 结合左右视点之间的相关性, 联合左右视点的第一个特征图进行张量分解, 得到立体图像的主要能量特征图。最后, 将主要能量特征图进行奇异值分解, 并嵌入水印从而提高鲁棒性。实验结果表明, 该方法具有较高的鲁棒性和不可见性, 并且实现了水印的盲提取。

关键词: 立体图像; 鲁棒水印; 张量分解; 相关性; 盲提取

中图分类号: TP391

文献标志码: A

引用格式: 张芳燕, 骆挺, 蒋刚毅, 等. 基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法[J]. 光电工程, 2018, 45(12): 180054

Robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views

Zhang Fangyan¹, Luo Ting^{1,2*}, Jiang Gangyi¹, Xu Haiyong^{1,2}, Zhou Wujie³¹Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;²College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315212, China;³College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract: To solve the copyright protection of stereo images, a robust stereo image watermarking method based on correlations of left and right views is proposed. Because the tucker decomposition can preserve the main energy of the image well, tucker decomposition is performed on left and right views, respectively, to make full use of the correlations of three channels in the color view. Each view is decomposed into three feature images, where the first feature map retains relationships of three channels in each view. Secondly, considering correlations between the left and right views, the first feature images of the left and right viewpoints are combined to be performed by using tucker decomposition, and the main energy features images of the stereo image are obtained. Finally, the main energy

收稿日期: 2018-01-28; 收到修改稿日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501270); 宁波市自然科学基金项目(2017A610127)

作者简介: 张芳燕(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事多媒体信息隐藏的研究。E-mail: zhangfangyan626@126.com

通信作者: 骆挺(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事多媒体通信、信息隐藏的研究。E-mail: luoting@nbu.edu.cn

feature image is decomposed by singular value decomposition, and watermark is embedded for the purpose of improving the robustness. Experimental results show that the proposed method has high robustness and invisibility, and realizes blind extraction of watermark.

Keywords: stereo image; robust watermarking; tucker decomposition; correlation; blind extraction

Citation: Zhang F Y, Luo T, Jiang G Y, et al. Robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180054

1 引言

随着网络 and 多媒体技术的发展,二维图像/视频在人们的生活、学习和工作等各个方面已普遍存在,且实时的二维视频可视通信已经走向成熟。普通的单视点图像视频已经不能满足人们的视觉需求,3D 媒体的立体现实感逐渐成为了一种时尚的追求,立体视频图像增加了景物的深度信息,增强了视觉的现实感和逼真感^[1-2]。市场对立体视频系统开发与应用的需求也越来越迫切,如在立体数字电视、远程教育、三维视频会议系统、虚拟现实系统、远程医疗等诸多领域有着广泛的应用前景^[3-4]。目前已有较多立体电影等多媒体在市场上流行,这些 3D 多媒体内容可能会通过互联网等非安全通道传输。如何有效地防范 3D 多媒体信息非法传播,已成为版权保护的一个重要问题。数字水印是有效解决版权保护的重要技术之一。

按照水印的特性,一般可以将水印分为脆弱水印和鲁棒水印。脆弱水印对任何修改都较敏感,适用于精确的篡改认证。文献[5]提出了基于脆弱水印的图像认证方法,利用滑动窗口技术和层次结构嵌入水印,能够较准确地定位小分块的篡改。文献[6]利用图像块的离散正弦变换(discrete cosine transform, DCT)系数生成水印嵌入到偏移图像块的次低位;然后,将恢复水印作为图像块内容的一部分生成认证水印,将其嵌入到图像块的最低有效位。该方法不仅能够准确定位被篡改的位置,并且能够区分是水印被篡改还是图像内容被篡改,在一定条件下可以将内容篡改的区域进行恢复。文献[7]提出了一种基于图像内容可恢复的半脆弱水印方法,利用自适应水印对图像进行认证以及篡改定位,并采用零水印恢复图像。该方法还能有效抵抗部分图像攻击,例如 JPEG 压缩等。

鲁棒水印能够抵抗一定程度的常规攻击和恶意攻击,且不影响水印的检测和提取^[8-10]。一般鲁棒水印利用不同变换域的系数特征嵌入水印,从而达到鲁棒性。文献[11]提出了一种基于 DCT 的水印方法,图像经过

正交三角(QR)分解,计算得到一种稳定的特征,并通过量化索引调制(quantization index modulation, QIM)算法修改该特征从而嵌入水印,提高了感知能力。文献[12]利用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)提出一种鲁棒量化水印方法,在抵抗亮度和对比度调整上具有较强的鲁棒性,然而在噪声等攻击上具有较弱的抵抗力。对于鲁棒水印在考虑鲁棒性的同时,也必须考虑水印的不可见性。文献[13]提出一种基于混合 DWT、DCT 和奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的方法,并利用最小二乘曲线拟合得到最优嵌入强度,取得了水印不可感知性和鲁棒性的平衡。文献[14]将彩色图像分为 Y 分量和 CbCr 分量,并根据各自直方图特征嵌入水印,提高了水印的不可见性和鲁棒性。文献[15]通过增加变量的数量和扩展变换空间改进 Arnold 变换,并结合神经网络优化了水印的不可感知性和鲁棒性。此外,水印的安全性也是鲁棒水印的重要因素。文献[16]提出了基于混沌混合的盲图像水印方法,结合混沌动力学,使方法更具有安全性。

以上都是针对单视点图像的鲁棒水印。然而,至今,针对立体图像的鲁棒水印方法报道仍旧较少。文献[17]针对立体图像提出了自恢复的脆弱水印。在鲁棒性方面,文献[18]提出一种面向对象的立体图像水印方法,但是该方法只能有效抵抗 JPEG 等压缩攻击,并且量化系数会导致较严重的图像失真。文献[19]提出了一种基于关系调制的立体图像水印方法,将立体图像分块并定义图像块的极性,根据水印与左右图像块极性的关系嵌入水印,提高了水印鲁棒性。然而该方法需要较多的边信息传递。文献[20]提出了一种基于非匹配块位图的立体图像鲁棒水印方法,通过对 DCT 的 AC 系数随机分组选择水印嵌入位置,增强了水印的鲁棒性,但是图像质量较差。文献[21]提出了一种基于 DCT-SVD 的立体图像版权保护的混合水印方法,能够抵御盐椒、噪声、高斯等图像攻击,但是 JPEG 压缩和剪切等攻击抵抗效果较差。以上立体图像

水印方法中,没有充分考虑视点中彩色图像三通道的相关性,也没有较好利用左右视点的相关性。

针对立体图像的版权问题,提出了基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法。首先,对左右视点分别进行张量分解,分别得到第一特征图,从而保留视点中各彩色通道的相关性。同时,对左右视点第一特征图进行联合张量分解,保留了左右视点的相关性,最终计算得到立体图像的主要能量特征图。其次,利用 SVD 分解主要能量特征图,计算得到重要的系数矩阵,通过改变该系数矩阵嵌入水印。实验证明,本方法能够有效抵抗较多类型的图像攻击,并且具有较好的鲁棒性。

2 张量

张量是一个多维数组,其阶数是其维度的数量。张量分解有两种方法,即 CP 和 Tucker 分解,本文主要是采用 Tucker 分解的形式。Tucker 分解是将原始张量分解成核心张量和一系列矩阵的乘积的形式,其中核心张量保留了原张量的主要信息。例如张量 X 表示为

$$X = G \times_1 H^{(1)} \times_2 H^{(2)} \dots \times_i H^{(i)} \dots \times_n H^{(n)} \quad (1)$$

其中: G 表示核心张量,符号 \times_i 表示张量乘以模态 i 下的矩阵, $H^{(i)}$ 表示的是模态 i 下展开的张量经过 SVD 得到的正交奇异矩阵,其中三阶张量分解如图 1 所示。其核心张量表达式为

$$G = X \times_1 (H^{(1)})^T \times_2 (H^{(2)})^T \dots \times_i (H^{(i)})^T \dots \times_n (H^{(n)})^T \quad (2)$$

张量的矩阵化:张量的矩阵化是将张量中的元素重新排列,得到一个矩阵的过程。对于 N 阶张量,其张量模态- N 的展开对应各维度上的张量矩阵化的矩阵。其展开形式如下:

对于一个三阶张量 $A \in R^{3 \times 3 \times 2}$, 设其前切面为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 123 \\ 456 \\ 789 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 111213 \\ 141516 \\ 171819 \end{bmatrix},$$

其在第 1 模态下展开的矩阵为

$$A_{(1)} = \begin{bmatrix} 123111213 \\ 456141516 \\ 789171819 \end{bmatrix};$$

其在第 2 模态下展开的矩阵为

$$A_{(2)} = \begin{bmatrix} 147111417 \\ 258121518 \\ 369131619 \end{bmatrix};$$

其在第 3 模态下展开的矩阵为

$$A_{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 2 & 5 & 8 & 3 & 6 & 9 \\ 11 & 14 & 17 & 12 & 15 & 18 & 13 & 16 & 19 \end{bmatrix}。$$

张量的模态- N 展开,分解后得正交奇异矩阵,而张量分解就是分解为核心张量和正交奇异矩阵。

对于大小为 $M \times N$ 的彩色图像 I 来说,可以表示为一个三阶张量:

$$A = G \times_1 H^{(1)} \times_2 H^{(2)} \times_3 H^{(3)} \quad (3)$$

其中: G 表示核心张量, $H^{(1)}$, $H^{(2)}$ 和 $H^{(3)}$ 分别是大小 $M \times M$, $N \times N$ 和 3×3 的正交奇异矩阵。

设 $K = G \times_1 H^{(1)} \times_2 H^{(2)}$ 是一个张量 A 具有相同阶数和维数的子张量, $P_i (1 \leq i \leq 3)$ 为子张量 K 第 i 个通道的 $M \times N$ 矩阵,则彩色图像的第 t 通道表示为 P_i 的线性组合:

$$Y_t = H_{t,1}^{(3)} P_1 + H_{t,2}^{(3)} P_2 + H_{t,3}^{(3)} P_3 \quad (4)$$

从上式发现,彩色图像的每一通道图像是 $\{P_i | i=1,2,3\}$ 的一个线性组合,并且正交矩阵 $H^{(3)}$ 的每一行代表着每一通道图像间的相关系数。在这里, $\{P_i | i=1,2,3\}$ 表示一组特征图像,而且,彩色图像 I 的能量是每一幅特征图像 $\{P_i | i=1,2,3\}$ 的能量之和,即:

$$\|A\|^2 = \|K\|^2 = \sum_{i=1}^3 \|P_i\|^2 \quad (5)$$

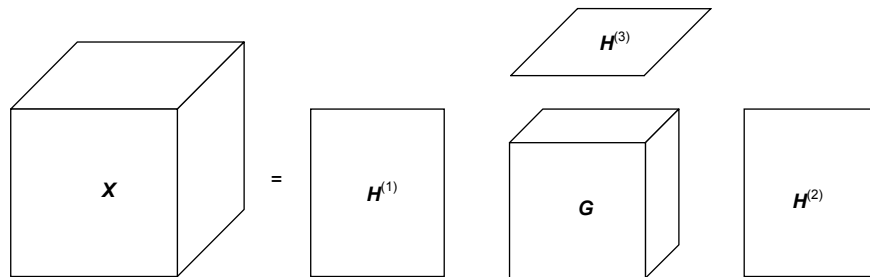


图 1 三阶张量分解示意图

Fig. 1 Third-order tensor decomposition diagram

其中： $\|\cdot\|$ 表示 F 范数。由于对三阶张量在模态 3 下展开的矩阵进行 SVD 分解，得到正交奇异矩阵 U, V 和奇异矩阵 S 。根据 SVD 分解性质可知，奇异矩阵 S 为对角矩阵，对角线上元素为特征值，且是从大到小的排列；左奇异矩阵列向量为特征向量，对应各特征值。而左奇异矩阵 U 由于是在模态 3 下分解得出，故大小为 3×3 。由此性质可得：

$$\|P_1\|^2 \geq \|P_2\|^2 \geq \|P_3\|^2 \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可知，一个彩色图像的能量在它的特征图像之间按照从第一特征图像到最后一幅特征图像由高到低的顺序分布。在这里，我们称 P_1 为第一特征图， P_2 为第二特征图， P_3 为第三特征图。由于 $\{P_i|i=1,2,3\}$ 是子张量 K 的三个通道的矩阵，根据张量乘法计算：

$$K = A \times_3 (H^{(3)})^T \quad (7)$$

第一特征图 P_1 包含了三个通道的主要能量，也可称为主要能量图，如图 2 所示。特征图 $\{P_i|i=1,2,3\}$ 反映了彩色图像在三个通道的颜色变化。由于第一特征图包含了大部分的图像能量，仍然保持着色彩的感知效果，因此相比 P_2 和 P_3 ，在 P_1 中更适合嵌入水印。同理，对于左右视点的特征图，也可联合被认为三阶张量相应分解的第一特征图包含了左右视点的相关性，同时也保留了各视点中彩色三通道的相关性。

3 基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法

由于张量分解产生的特征图能够保持原始图像的主要能量，利用该特性，提出了基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法。如图 3(a)所示，首先，将左右彩色视点分别进行张量分解，分别产生左右视点

的第一特征图 EA_1, EB_1 。其次，为了保留立体图像的左右视点相关性，再将左右视点的第一特征图 EA_1, EB_1 联合，并进行张量分解，得到立体图像的主要能量图 P_1 。该能量图既包含了两个彩色视点三通道相关性，又保留了左右视点相关性。最后，将 P_1 进行 SVD 分解，并嵌入水印。水印提取为水印嵌入的逆过程，以下将详细描述水印嵌入过程和水印提取过程。

3.1 水印嵌入过程

方法的重点为将左右视点进行张量分解得到立体图像的主要能量图，在该图中嵌入水印，如图 3(a)所示。具体嵌入过程如下：

步骤 1) 为了水印安全性，根据密钥 k ，生成一个大小为 $m \times n$ 的随机序列，作为水印 W 。

步骤 2) 将左右视点看做两个三阶张量 A, B ，分别对 A, B 进行张量分解，分别计算得到三个特征图 EA_1, EA_2, EA_3 和 EB_1, EB_2, EB_3 。

步骤 3) 将两个第一特征图 EA_1, EB_1 联合：

$$C = [EA_1 \quad EB_1] \quad (8)$$

其中： C 表示联合后图像， EA_1 和 EB_1 分别作为图像 C 的第一和第二通道分量。对 C 进行张量分解得到两张特征图 P_1, P_2 ，其中 P_1 为立体图像的主要能量特征图。

步骤 4) 将特征图 P_1 分成互不重叠的 4×4 的图像块 $P_{1,x,y}$ ，其中 (x,y) 表示图像块的位置。

步骤 5) 根据式(9)对每一图像块进行 SVD 分解。

$$P_{1,x,y} = U_{x,y} S_{x,y} (V_{x,y})^T \quad (9)$$

步骤 6) 根据式(10)和式(11)，利用修改矩阵 $U_{x,y}$ 第一列中第二行值 u_2 和第三行 u_3 ，嵌入水印。

当 $w = 1$ 时：

$$\begin{cases} u'_2 = \text{sign}(u_2) \times (\beta - T/2) \\ u'_3 = \text{sign}(u_3) \times (\beta + T/2) \end{cases} \quad (10)$$

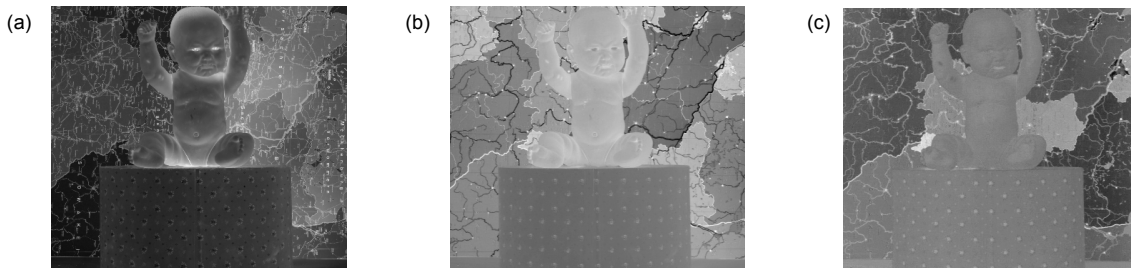


图 2 图像 Baby 张量分解后的三个特征图。(a) 第一特征图；(b) 第二特征图；(c) 第三特征图

Fig. 2 Three feature images of Baby after Tucker decomposition. (a) The first feature image; (b) The second feature image; (c) The third feature image

当 $w = 0$ 时 :

$$\begin{cases} u'_2 = \text{sign}(u_2) \times (\beta + T/2) \\ u'_3 = \text{sign}(u_3) \times (\beta - T/2) \end{cases}, \quad (11)$$

其中: $\text{sign}(\bullet)$ 是得到符号值, $\beta = (u_2 + u_3)/2$, T 为嵌入强度, 修改后将会得到新的 $U'_{x,y}$ 。重复步骤 5) 至步骤 6), 直至所有水印完全嵌入。

步骤 7) 根据含水印的矩阵 $U'_{x,y}$, 进行 SVD 逆变换, 得到含水印的图像块, 并计算得到含水印的主要能量图 P'_1 。

步骤 8) 根据式(12), 计算含水印的联合图 C' 的张量 E' , 其第一、第二通道分量分别含水印的左右视点的第一特征图 EA'_1 、 EB'_1 。

$$E' = P'_1 \times_3 U^{(3)}. \quad (12)$$

步骤 9) 根据式(13), 利用含水印的第一特征图 EA'_1 、 EB'_1 , 分别计算嵌入水印后的左右的三阶张量 A' 、 B' , 最后得到含水印的立体图像。

$$A' = EA'_1 \times_3 U^{(3)}. \quad (13)$$

3.2 水印提取过程

如图 3(b)所示, 水印提取过程是水印嵌入过程的逆过程。首先, 将左右彩色视点分别进行张量分解, 分别产生左右视点的第一特征图 EA'_1 、 EB'_1 。其次, 再将左右视点的第一特征图 EA'_1 、 EB'_1 联合作为图像 C 的第一、第二通道分量进行张量分解, 得到立体图像的主要能量图 P'_1 。最后, 将 P'_1 进行 SVD 分解, 并提取水印。其详细提取过程如下:

步骤 1) 将含水印的左右视点分别看成为张量 A' 、 B' , 分别对张量 A' 、 B' 进行张量分解, 分别计算得到三个特征图 EA'_1 、 EA'_2 、 EA'_3 和 EB'_1 、 EB'_2 、 EB'_3 。

步骤 2) 将两个第一特征图 EA'_1 、 EB'_1 联合为图 C' , 并进行张量分解, 计算得到两张特征图 P'_1 和 P'_2 , 其中 P'_1 为立体图像的主要能量特征图。

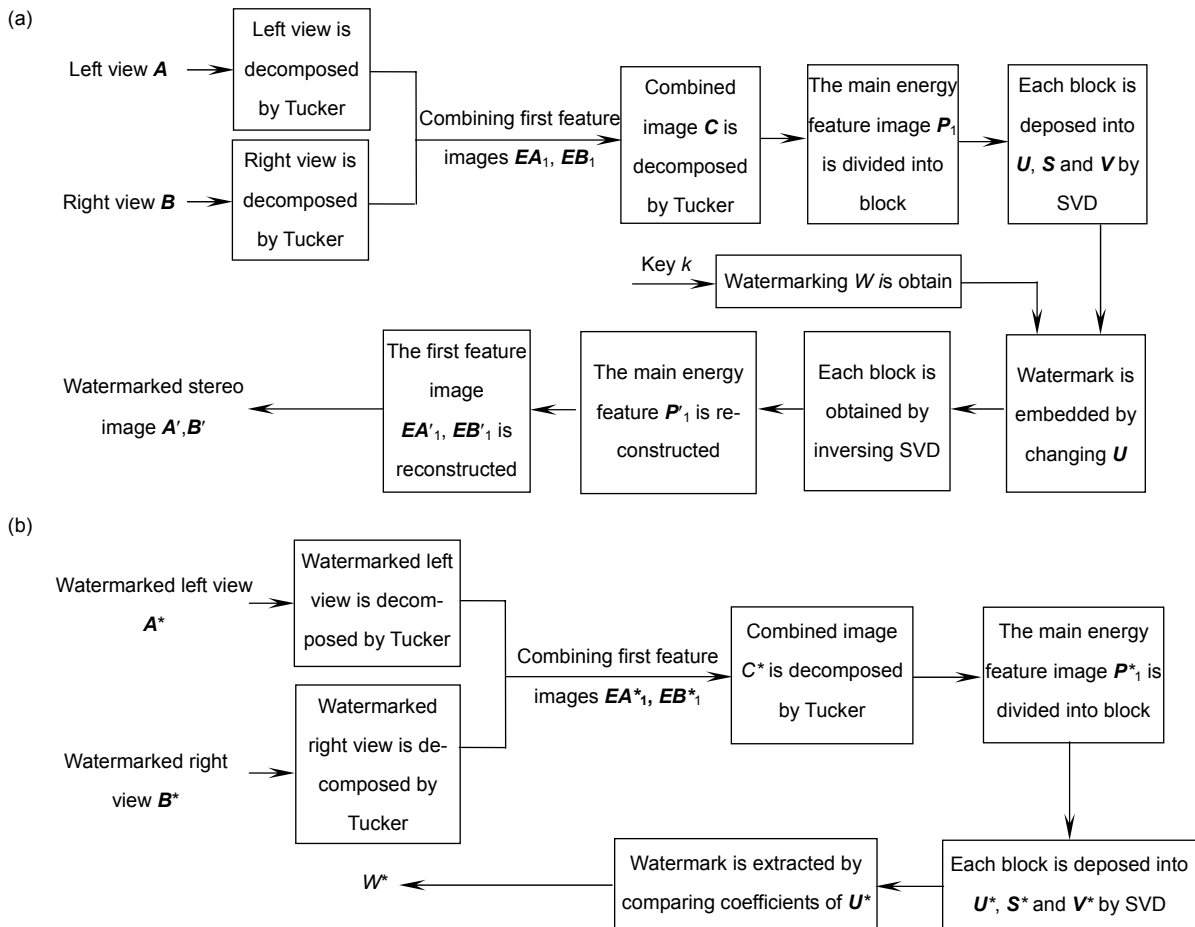


图 3 基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法框图。(a) 水印嵌入过程; (b) 水印提取过程

Fig. 3 Block diagrams of robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views. (a) Watermark embedding process; (b) Watermark extraction process

步骤 3) 将特征图 P^* 分成互不重叠的 4×4 大小的图像块 $P^*_{1,x,y}$ 。

步骤 4) 根据式(14)对每一图像块 $P^*_{1,x,y}$ 进行 SVD 分解。

$$P^*_{1,x,y} = U^*_{x,y} S^*_{x,y} (V^*_{x,y})^T \quad (14)$$

步骤 5) 根据 $U^*_{x,y}$ 中 u_2^* 和 u_3^* 提取水印 w^* :

$$\begin{cases} w^* = 0 & u_1^* \geq u_2^* \\ w^* = 1 & u_1^* < u_2^* \end{cases} \quad (15)$$

步骤 6) 重复步骤 4)和 5), 直到所有的水印 W 都被提取。

4 实验结果分析

为了对嵌入水印后的载体图像的质量进行评价, 本文采用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性(structural similarity, SSIM)来计算, 用归一化相似度(normalized similarity, NC, 用 S_{NC} 来表示)来评价水印质量, 其计算公式为

$$S_{NC} = \frac{S_{NC}(W, W^*)}{S_{NC}(W) \cdot S_{NC}(W^*)} \quad (16)$$

其中 :

$$S_{NC}(W, W^*) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{z=1}^3 (W(x, y, z) \times W^*(x, y, z)) \quad (16)$$

$$S_{NC}(W) = \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{z=1}^3 [W(x, y, z)]^2}$$

$$S_{NC}(W^*) = \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{z=1}^3 [W^*(x, y, z)]^2}$$

为了验证本方法的有效性, 从 MiddleBury 序列库中选取了 4 对立体图像, 具有不同的纹理, 如图 4 所示。水印信息是根据密钥 k 产生的 256×256 的随机序列数。为了对比本方法的实验效果, 将左视点中应用张量分解得到第一特征图, 并用相同的嵌入算法嵌入水印, 其中容量为嵌入立体图像容量的一半, 该方法命名为方法 1。在无攻击情况下得到的含水印的立体图像对如图 5 所示。

表 1 列举了在本方法和方法 1 下 4 对立体图像的 PSNR 和 SSIM 值, 从主观视觉上无法分辨两者的区别。其中本方法和方法 1 的 PSNR 都超过 40 dB, SSIM 都约为 1, 表明此两种方法都具有较好的不可感知性。从表中可知, 本方法和方法 1 的 PSNR 和 SSIM 值都较相近。为了验证本方法的鲁棒性, 分别对含水印图像进行卷积滤波(convolution filter)、JPEG 压缩(JPEG compression)、中值滤波(median filter)、缩放(scaling)和剪切(cropping)等攻击, 各攻击参数如表 2 所列。

表 3 列出了 4 对立体图像受攻击后的提取水印效果。从表中可知, 图像受到不同攻击后, 提取水印的 NC 值都高于 0.7, 因此表示提取的水印可全部识别, 从而有效保护了立体图像的版权。除了含水印的图像在 JPEG(50)攻击后, 本方法的 NC 值和方法 1 低于 0.9 外, 其他所有的攻击 NC 值都高于 0.9 以上, 因此该两种鲁棒水印方法都能够有效抵抗上述类型攻击, 这表明张量分解得到的第一特征图能够有效保留图像的主要能量, 从而保证了水印的鲁棒性。



图 4 原始左右视点。(a) Baby; (b) Bowling; (c) Art; (d) Dolls

Fig. 4 Original stereoscopic images. (a) Baby; (b) Bowling; (c) Art; (d) Dolls

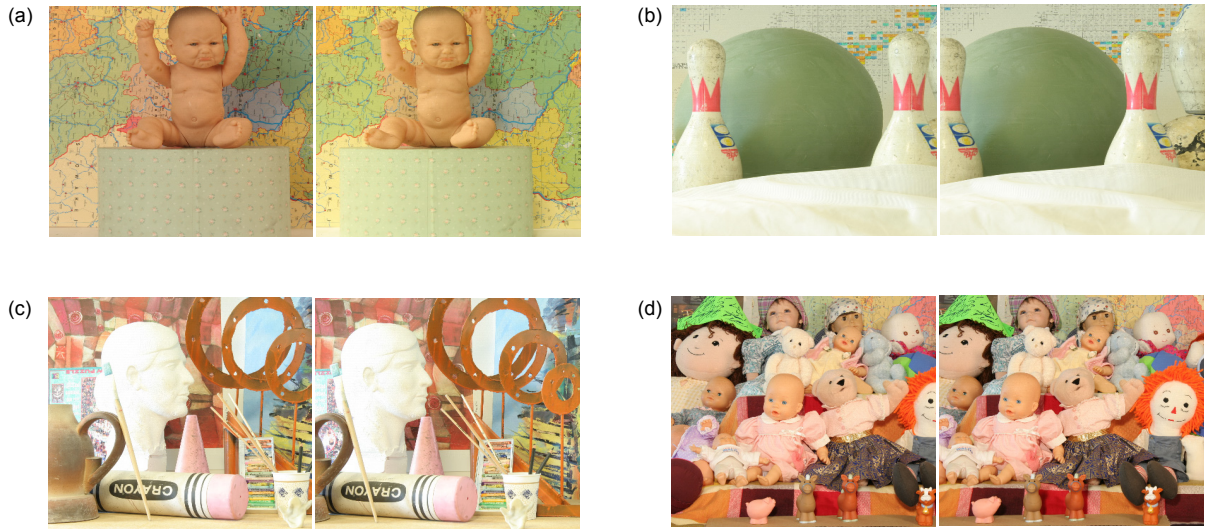


图 5 含水印的左右视点。(a) Baby; (b) Bowling; (c) Art; (d) Dolls
 Fig. 5 Watermarked stereoscopic images. (a) Baby; (b) Bowling; (c) Art; (d) Dolls

表 1 各立体图像的 PSNR 和 SSIM
 Table 1 PSNR and SSIM of all stereoscopic image

| Image | Proposed | | | | Method 1 | |
|----------|-----------|--------|------------|--------|----------|--------|
| | Left view | | Right view | | PSNR | SSIM |
| | PSNR | SSIM | PSNR | SSIM | | |
| Baby1 | 42.12 | 1.0000 | 42.28 | 1.0000 | 42.20 | 1.0000 |
| Bowling1 | 43.81 | 1.0000 | 44.04 | 1.0000 | 43.99 | 1.0000 |
| Art | 43.54 | 1.0000 | 43.66 | 0.9999 | 44.00 | 1.0000 |
| Dolls | 41.43 | 1.0000 | 41.48 | 0.9999 | 41.49 | 1.0000 |

表 2 攻击参数
 Table 2 Attack parameters

| Attack | Parameter value |
|--------------------|--|
| | Window size=3×3 |
| Convolution filter | Conv1: $a=1/9, b=2/9, c=1/9, d=2/9, e=4/9, f=2/9, g=1/9, h=2/9, i=1/9$ Conv2: $a=0, b=-1/9, c=0, d=-1/9, e=5/9, f=-1/9, g=0, h=-1/9, i=0$ |
| JPEG compression | Quality factor: 50, 90 |
| Median filter | Window size: 3×3, 5×5 |
| Scaling | Ratio (on each side): 0.9, 1.1, 1.5, 2 |
| Cropping | Retain ratio (on each side): 0.71, 0.78, 0.84, 0.9, 0.95 |

表 3 所有视点攻击后提取水印的 NC
Table 3 NC of all views by different attacks

| Attack | Baby | | Bowling | | Art | | Dolls | |
|--------------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| | Proposed | Method 1 | Proposed | Method 1 | Proposed | Method 1 | Proposed | Method 1 |
| Conv1 | 0.9416 | 0.9320 | 0.9744 | 0.9695 | 0.9464 | 0.9451 | 0.9270 | 0.9214 |
| Conv2 | 0.9748 | 0.9711 | 0.9972 | 0.9955 | 0.9888 | 0.9803 | 0.9861 | 0.9809 |
| JPEG90 | 0.9693 | 0.9542 | 0.9548 | 0.9531 | 0.9612 | 0.9150 | 0.9839 | 0.9781 |
| JPEG50 | 0.7124 | 0.7268 | 0.7601 | 0.7737 | 0.7132 | 0.7224 | 0.7381 | 0.7748 |
| Median3×3 | 0.9776 | 0.9677 | 0.9929 | 0.9921 | 0.9764 | 0.9150 | 0.9586 | 0.9474 |
| Median5×5 | 0.9721 | 0.9642 | 0.9924 | 0.9929 | 0.9769 | 0.9725 | 0.9601 | 0.9515 |
| Scaling0.9 | 0.9461 | 0.9406 | 0.9634 | 0.9571 | 0.9461 | 0.9405 | 0.9341 | 0.9340 |
| Scaling1.1 | 0.9737 | 0.9723 | 0.9849 | 0.9810 | 0.9721 | 0.9711 | 0.9704 | 0.9646 |
| Scaling1.5 | 0.9766 | 0.9728 | 0.9862 | 0.9821 | 0.9745 | 0.9736 | 0.9723 | 0.9634 |
| Scaling2 | 0.9762 | 0.9727 | 0.9861 | 0.9822 | 0.9744 | 0.9729 | 0.9723 | 0.9629 |
| Cropping0.71 | 0.9261 | 0.9014 | 0.9253 | 0.8999 | 0.9215 | 0.8958 | 0.9230 | 0.8961 |
| Cropping0.78 | 0.9392 | 0.9227 | 0.9382 | 0.9210 | 0.9341 | 0.9187 | 0.9370 | 0.9187 |
| Cropping0.84 | 0.9550 | 0.9353 | 0.9548 | 0.9338 | 0.9502 | 0.9303 | 0.9526 | 0.9303 |
| Cropping0.9 | 0.9695 | 0.9594 | 0.9698 | 0.9575 | 0.9664 | 0.9566 | 0.9685 | 0.9568 |
| Cropping0.95 | 0.9842 | 0.9786 | 0.9835 | 0.9769 | 0.9800 | 0.9765 | 0.9831 | 0.9764 |
| Average | 0.9455 | 0.9381 | 0.9576 | 0.9512 | 0.9455 | 0.9324 | 0.9445 | 0.9372 |

尽管，在 JPEG(50)攻击后，本方法的 NC 值略低于方法 1，然而在 JPEG(90)、Median(3×3)、Median(5×5)和 Cropping 等攻击，本方法的 NC 值明显高于方法 1。其中相比方法 1，在 Cropping(0.71)、Cropping(0.78)、Cropping(0.84)、Cropping(0.9)和 Cropping(0.95)攻击后，提取的 NC 值分别高 0.25、0.15、0.2、0.1 和 0.05。因此，本方法对 Cropping 攻击具有较好的鲁棒性。在表 3 最后一行中，列出了在不同攻击后，所有提取水印的 NC 的平均值。从表中可知，本方法的平均 NC 值高于方法 1，再次表明本方法的鲁棒性要优于方法

1。这也表明，在基于彩色视点三通道的关系基础上，再利用左右视点的相关性，能够获得立体图像的最主要能量，从而保证本方法的鲁棒性。

为了更有效地表明本文方法的鲁棒性，与文献[19]的方法进行比较。从表 4 可知，尽管对于 JPEG(90)攻击，文献[19]的 NC 值略高于本文方法的 NC 值，但对于其它攻击，本文方法的鲁棒性都优于文献[19]。结合表 3 和表 4 本文方法在抵抗 JPEG、Median、Scaling、Cropping 等攻击时具有较好的鲁棒性。

为了进一步可视化本方法水印的鲁棒性，将如图

表 4 算法结果比较
Table 4 Comparison of algorithm result

| Attack | Ref. [19] | Proposed |
|----------------------|-----------|----------|
| JPEG90 | 0.9766 | 0.9673 |
| Gaussian low pass3×3 | 0.9899 | 0.9929 |
| Median3×3 | 0.9132 | 0.9764 |
| Average3×3 | 0.9327 | 0.9666 |
| Cropping1/8 | 0.8766 | 0.9904 |
| Cropping1/4 | 0.7462 | 0.9955 |
| Cropping1/2 | 0.4909 | 0.9891 |

6 所示的水印嵌入立体图像中。立体图像受到不同图像攻击后,提取的水印如图 7 所示,其内容能够清晰识别,从而有效地保护图像的版权。综上所述,本方法的水印具有一定不可见性,并对于各类型攻击具有较好的鲁棒性。

5 结 论

本文提出了一种基于左右视点相关性的立体图像鲁棒水印方法,利用左右视点相关性,分别对两个视

点进行张量分解,两个视点分别得到三个特征图,再联合左右视点的第一特征图进行张量分解,最后得到两张特征图,对其中的第一特征图进行水印嵌入。本方法特点在于利用左右视点相关性,结合张量分解,较好地保存图像的主要能量。实验结果表明,本文算法比在单视点中嵌入水印具有更好的鲁棒性和不可感知性,能很好地对水印进行盲提取。在本文基础上,将进一步从张量的角度考虑左右视点和视频序列的水印算法。

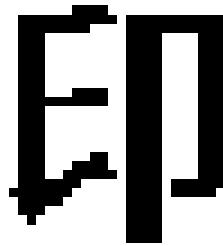


图 6 原始水印
Fig. 6 Original watermark

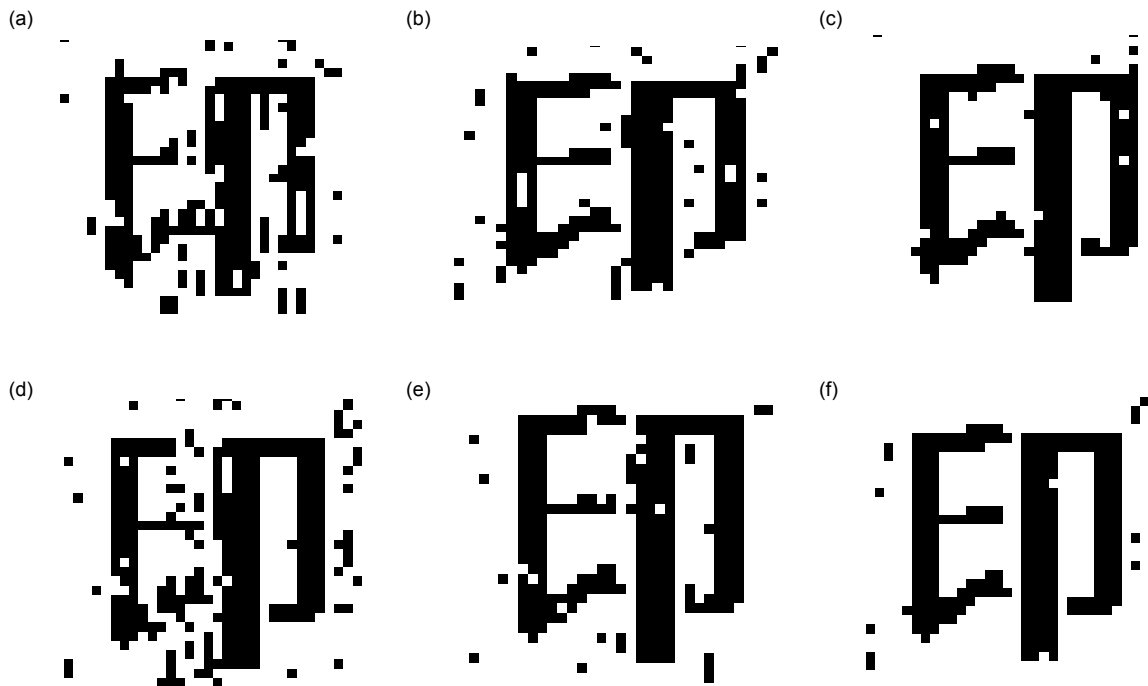


图 7 攻击后提取的水印图像。(a) Conv1(NC=0.9249); (b) Conv2(NC=0.9655); (c) JPEG90(NC=0.9884); (d) Scaling0.9(NC=0.9271); (e) Scaling2(NC=0.9781); (f) Cropping0.95(NC=0.9911)

Fig. 7 Extracted watermark image after attack. (a) Conv1(NC=0.9249); (b) Conv2(NC=0.9655); (c) JPEG90(NC=0.9884); (d) Scaling0.9(NC=0.9271); (e) Scaling2(NC=0.9781); (f) Cropping0.95(NC=0.9911)

参考文献

- [1] Schierl T, Narasimhan S. Transport and storage systems for 3-D video using MPEG-2 systems, RTP, and ISO file format[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(4): 671–683.
- [2] Zhang L, Vazquez C, Knorr S. 3D-TV content creation: automatic 2D-to-3D video conversion[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, **57**(2): 372–383.
- [3] Jiang L L, He J Q, Zhang N, et al. An overview of 3D video representation and coding[J]. *3D Research*, 2010, **1**(1): 43–47.
- [4] Smolic A, Mueller K, Stefanoski N, et al. Coding algorithms for 3DTV—a survey[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, **17**(11): 1606–1621.
- [5] Zhang X H, Yang Y T. Image authentication scheme research based on fragile watermarking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(1): 34–39.
张宪海, 杨永田. 基于脆弱水印的图像认证算法研究[J]. *电子学报*, 2007, **35**(1): 34–39.
- [6] Wang G D, Liu F L, Liu Y, et al. An image authentication scheme with discrimination of tampers on watermark or image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(7): 1349–1354.
王国栋, 刘粉林, 刘媛, 等. 一种能区分水印或内容篡改的脆弱水印算法[J]. *电子学报*, 2008, **36**(7): 1349–1354.
- [7] Liu D Y, Liu W B, Zhang G. Research of recoverable semi-fragile watermarking for image content[J]. *Journal of Image and Graphic*, 2010, **15**(1): 20–25.
刘东彦, 刘文波, 张弓. 图像内容可恢复的半脆弱水印技术研究[J]. *中国图象图形学报*, 2010, **15**(1): 20–25.
- [8] Bai T T, Liu Z, Lu P. Digital watermarking scheme in Contourlet domain based on QR code[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(4): 769–776.
白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于 QR 码的 Contourlet 域数字水印算法[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(4): 769–776.
- [9] Wang X H, Sun Y Q. Region of interest based watermarking algorithm based on QR code and Schur decomposition[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, **28**(4): 419–426.
王晓红, 孙业强. 基于 QR 码和 Schur 分解的感兴趣区域水印算法[J]. *光电子·激光*, 2017, **28**(4): 419–426.
- [10] Ren K Q, Zhang D D, Wu F. Adaptive robust image watermarking based on DCT and Hamming code[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(11): 54–61.
任克强, 张丹丹, 吴帆. 融合 DCT 和汉明码的自适应鲁棒图像水印[J]. *光电工程*, 2016, **43**(11): 54–61.
- [11] Chen H Y, Zhu Y S. A robust watermarking algorithm based on QR factorization and DCT using quantization index modulation technique[J]. *Journal of Zhejiang University-Science C*, 2012, **13**(8): 573–584.
- [12] Ye T Y. A robust quantization-based Gray watermarking algorithm in discrete wavelet transform domain[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(7): 120–125.
叶天语. 离散小波变换域鲁棒量化灰度水印算法[J]. *光电工程*, 2012, **39**(7): 120–125.
- [13] Kang X B, Zhao F, Lin G F, et al. A novel hybrid of DCT and SVD in DWT domain for robust and invisible blind image watermarking with optimal embedding strength[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, **77**(11): 13197–13224.
- [14] Cedillo-Hernández M, García-Ugalde F, Nakano-Miyatake M, et al. Robust hybrid color image watermarking method based on DFT domain and 2D histogram modification[J]. *Signal Image and Video Processing*, 2014, **8**(1): 49–63.
- [15] Sun L, Xu J C, Liu S W, et al. A robust image watermarking scheme using Arnold transform and BP neural network[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, **30**(8): 2425–2440.
- [16] Liu N S, Li H J, Dai H Y, et al. Robust blind image watermarking based on chaotic mixtures[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, **80**(3): 1329–1355.
- [17] Luo T, Jiang G Y, Wang X D, et al. Stereo image watermarking scheme for authentication with self-recovery capability using inter-view reference sharing[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, **73**(3): 1077–1102.
- [18] Campsi P. Object-oriented stereo-image digital watermarking[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2008, **17**(4): 043024.
- [19] Wu A H, Yu M, Peng Z J, et al. Relationship modulation based blind stereoscopic image watermarking algorithm for 3D media[C]// *International Conference on Internet Technology and Applications*. Wuhan, 2011: 1–4.
- [20] Ou Z H, Chen L H. A robust watermarking method for stereo-pair images based on unmatched block bitmap[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, **75**(6): 3259–3280.
- [21] Vo P H, Nguyen T S, Huynh V T, et al. A robust hybrid watermarking scheme based on DCT and SVD for copyright protection of stereo images[C]// *Proceedings of the 4th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science*. Hanoi, 2017: 331–335.

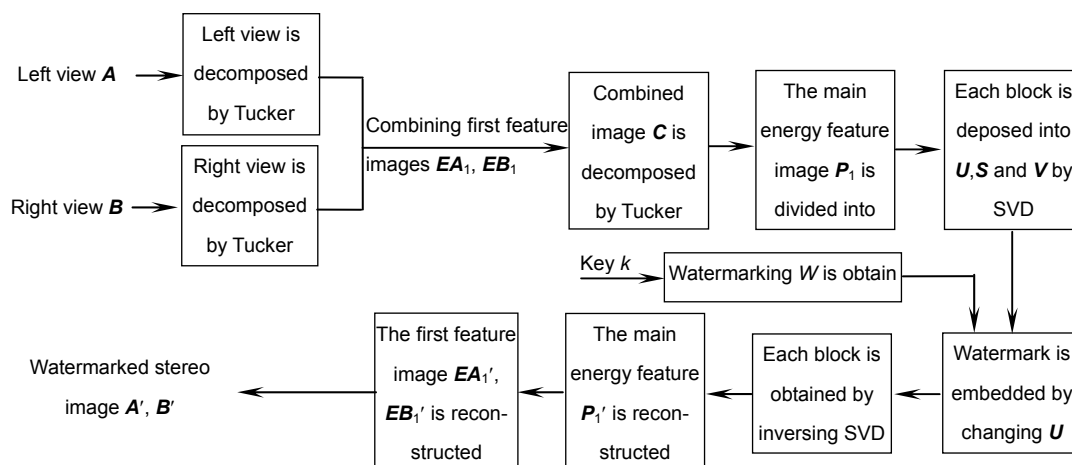
Robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views

Zhang Fangyan¹, Luo Ting^{1,2*}, Jiang Gangyi¹, Xu Haiyong^{1,2}, Zhou Wujie³

¹Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315212, China;

³College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China



Block diagrams of robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views

Overview: With the development of network and multimedia technology, two dimensional (2D) image or video has become ubiquitous in all aspects of people's life, and real-time 2D video visual communication has matured. However, the 2D video cannot meet the visual requirements of people. The 3D realism has gradually become a fashion pursuit, since 3D images or videos provide the depth information of the scene and enhance the sense of reality. The demand for the development and applications of the 3D video system in the market is becoming much more urgent. It has a wide range of applications prospects in many fields such as stereoscopic digital television, distance education, 3D video conference system, virtual reality system, telemedicine, etc. With the popularity of 3D videos or images, 3D multimedia content may be transmitted through the Internet and other non-secure channels, and they may be copied, tampered or illegally used. It is essential to prevent illegal dissemination of 3D multimedia information, and watermarking as embedding the secret data into the 3D images is the main technology of protecting copyright. So far, the robust watermarking method for the monocular image is almost mature, but only a few stereo image robust watermarking methods are reported. As shown in Fig, to solve the copyright protection of stereo images, a robust stereo image watermarking method based on correlations of left and right views is proposed. Because Tucker decomposition can preserve the main energy of the image well, it is performed on left and right views to make full use of the correlations of three channels in the color view. Each view is decomposed into three feature images, where the first feature map retains relationships of three channels in each view. Secondly, considering correlations between the left and right views, the first feature images of the left and right views are combined to be performed by using Tucker decomposition, and the main energy features images of the stereo image are obtained. Finally, the main energy feature image is decomposed by singular value decomposition, and watermark is embedded for the purpose of improving the robustness. The experimental results show that when different kinds of stereo images are attacked by Convolution Filter, JPEG compression, Median Filter, Scaling and Cropping, watermark can be extracted blindly, and recognized with high NC. Compared with the monocular image watermarking methods, the proposed algorithm is more robust.

Citation: Zhang F Y, Luo T, Jiang G Y, *et al.* Robust stereo images watermarking based on correlations of left and right views[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180054

Supported by National Natural Science Foundation of China (61501270) and Natural Science Foundation of Ningbo (2017A610127)

* E-mail: luoting@nbu.edu.cn